**dr hab. inż. Jan Butra** [1)]
**mgr inż. Rafał Dębkowski** [2)]
**dr inż. Daniel Pawelus** [1)]
**mgr inż. Marcin Szpak** [2)]

*Recenzent: dr hab. inż. Witold Pytel*

# Wpływ naprężeń pierwotnych na stateczność wyrobisk górniczych

*Słowa kluczowe: pierwotny stan naprężeń, stateczność wyrobisk górniczych, wzmożone naprężenia poziome*

***Streszczenie***
*Przedstawiono problematykę wpływu wzmożonych naprężeń pierwotnych na stateczność wyrobisk górniczych. Opisano stosowane w górnictwie światowym sposoby poprawy stateczności wyrobisk kopalnianych, wykonywanych w polu wzmożonych naprężeń poziomych.*

## 1. Wstęp

Wypracowane w polskim górnictwie rud miedzi rozwiązania profilaktyczne tąpaniowe i zawałowe, pozwalają na stosunkowo bezpieczną eksploatację złoża w coraz trudniejszych warunkach, wynikających z rosnącej głębokości oraz coraz większego skrępowania robót wybierkowych rozległymi polami zrobów. Jednocześnie prowadzone są prace analityczne mające na celu doskonalenie metod oceny stanu ww. zagrożeń oraz opracowanie nowych metod profilaktycznych. Doświadczenia górnictwa światowego wskazują, że przyczyną utraty stateczności wyrobisk górniczych i niektórych zjawisk dynamicznych ze skutkami w wyrobiskach mogą być wzmożone naprężenia poziome (większe od wielkości wynikającej z działania siły grawitacji). Doświadczenia górnictwa światowego wskazują, że niejednokrotnie składowa pozioma naprężeń w górotworze jest nawet kilkakrotnie większa od składowej pionowej. W kopalniach amerykańskich i australijskich wypracowano również pierwsze metody ograniczania zagrożenia zawałowego poprzez wykorzystanie informacji o rozkładzie i wielkości głównych naprężeń pierwotnych. Liczne obserwacje wskazują, że naprężenia pierwotne w skałach skorupy ziemskiej są wynikiem sumowania się pól naprężeń grawitacyjnych i tektonicznych.

[1)] *Politechnika Wrocławska, Instytut Górnictwa; Pl. Teatralny 2, 50-051 Wrocław*
[2)] *KGHM CUPRUM sp. z o.o. – CBR; ul. gen. Wł. Sikorskiego 2-8, 53-659 Wrocław*

## 2. Pierwotny stan naprężeń w górotworze

Ustalenie pierwotnego stanu naprężeń – w górotworze nienaruszonym działalnością górniczą stanowi punkt wyjścia wszelkich rozważań geomechanicznych. Wynika to z faktu, że w sytuacji wykonywania podziemnych robót górniczych, wszelkie zmiany geomechaniczne zachodzące w górotworze odnoszone są do stanu pierwotnego [13, 20]. Zdefiniowanie tego stanu jest najważniejszym elementem charakterystyki górotworu.

W sposób ogólny stwierdzić można, że głównymi czynnikami mogącymi wpływać na stan naprężenia w litosferze jest siła grawitacji, a konkretniej ciężar skał nadległych (budowa litologiczna) oraz możliwa obecność występowania naprężeń pochodzenia tektonicznego, związanych z dawnymi, dynamicznymi zjawiskami górotwórczymi, skutkujących deformacjami ciągłymi i nieciągłymi w górotworze. Elementami kształtującymi postać naprężeń pierwotnych są również: rzeźba (ukształtowanie) powierzchni terenu, przebieg procesu erozji i wietrzenia skał oraz sieć spękań i nieciągłości w masywie.

### 2.1. Pierwotny stan naprężeń w górotworze wywołany siłą grawitacyjną

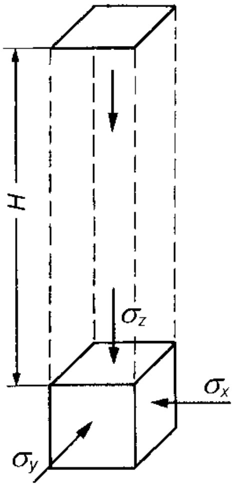
Wyznaczenie stanu naprężeń w górotworze nienaruszonym działalnością górniczą oparte jest na analizie ośrodka traktowanego jako półprzestrzeń sprężysta, ciągła, jednorodna i izotropowa. Ten wyidealizowany, uproszczony model budowy masywu górotworu obrazuje w dużym przybliżeniu wierzchnią warstwę skorupy ziemskiej, zbudowaną ze skał zwięzłych i litych [12]. Dla górotworu, w którym poza grawitacją nie ma innych obciążeń, analiza sprowadza się do określenia naprężeń działających na elementarną objętość o kształcie sześcianu, wyciętą z masywu skorupy ziemskiej na głębokości *H* (rys. 1).

Ciężar nadkładu działający w kierunku pionowym wywołuje naprężenie pionowe o wartości:

$$\sigma_z = \gamma \cdot H \tag{1}$$

gdzie:

$\sigma_z$ - naprężenie pionowe, [MPa],
$\gamma$ - ciężar objętościowy skał nadkładu, [MN/m$^3$],
H - głębokość zalegania rozpatrywanej warstwy skalnej, [m].




Rys. 1. Składowe pierwotnego stanu naprężenia w górotworze nienaruszonym [20]

Jeśli pominie się ciężar własny sześcianu, to można przyjąć, że na jego dolną ściankę działa również naprężenie $\sigma_z$. Pod wpływem naprężeń pionowych powinny w wyciętym elemencie występować odkształcenia poprzeczne, powodujące jego poszerzenie się na boki. Taka postać odkształceń jest prosto wytłumaczalna w sytuacji, gdy podłoże pod danym sześciennym elementem stanowi nieskończenie sztywna płyta, a każdy elementarny sześcian posiada jednakowe parametry fizyko-mechaniczne.

Odkształcenia te określa właściwy dla danego ośrodka współczynnik Poissona $\nu$ wyznaczany laboratoryjne dla skał. Jednak sąsiadujące z rozpatrywanym elementem inne elementarne sześciany, które leżą w tej samej płaszczyźnie poziomej i są poddane takim samym ciśnieniom pionowym, również dążyć będą z równą siłą do odkształcania się w kierunku poprzecznym. Dlatego przyjmuje się, że odkształcenia poprzeczne rozpatrywanego elementarnego sześcianu są równe zeru [12]. Pod wpływem naprężenia pionowego $\sigma_z$ i wobec braku możliwości odkształceń poprzecznych ($\varepsilon_x$ = 0, $\varepsilon_y$ = 0) na powierzchniach bocznych sześcianu pojawiają się jednakowe co do wartości naprężenia poziome $\sigma_x = \sigma_y$. Ich wielkość określa się wychodząc z uogólnionego prawa sprężystości Hooke'a, przyjmując tym samym liniową zależność pomiędzy naprężeniami a odkształceniami, zgodnie ze wzorem:

$$\varepsilon_x = \varepsilon_y = \frac{1}{E}\left[\sigma_x - \nu\left(\sigma_y + \sigma_z\right)\right] = 0 \tag{2}$$

gdzie:

$\varepsilon_x$ - odkształcenie liniowe w kierunku osi x, [-],
$\varepsilon_y$ - odkształcenie liniowe w kierunku osi y, [-],
E - moduł sprężystości liniowej, [MPa],

$\sigma_x$ - naprężenie poziome wzdłuż osi x, [MPa],
$\sigma_y$ - naprężenie poziome wzdłuż osi y, [MPa],
$\sigma_z$ - naprężenie pionowe wzdłuż osi z, [MPa],
v - współczynnik Poissona, [-].

Po podstawieniu w równaniu (2) $\varepsilon_x = 0$, $\varepsilon_y = 0$ oraz $\sigma_x = \sigma_y$ otrzymuje się zależność do wyznaczenia wartości naprężenia poziomego, które działa na boczne ścianki elementarnej cząstki górotworu [13,16,34]. Równanie przyjmuje postać:

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{v}{1-v} \cdot \sigma_z \tag{3}$$

Dla naprężeń poziomych wyznaczanych za pomocą wzoru (3) zawsze spełniony jest warunek:

$$\sigma_x = \sigma_y \le \sigma_z \tag{4}$$

Jeżeli masyw skalny znajduje się pod działaniem dodatkowych sił, wówczas następuje tensorowe sumowanie się naprężeń i pojawia się typowy stan trójosiowy, gdzie wszystkie trzy naprężenia normalne są różne. Dla układu trójosiowego tensor naprężeń zapisany w postaci macierzy przedstawia się następująco:

$$T_n = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \tag{5}$$

gdzie:
$T_n$ - tensor naprężeń, [MPa],
$\sigma$ - naprężenia normalne, [MPa],
$\tau$ - naprężenia styczne, [MPa].

Na podstawie przeprowadzonej analizy można przyjąć, że w górotworze pierwotnym, nienaruszonym działalnością górniczą, panuje trójosiowy stan naprężeń. W uproszczonym modelu ośrodka skalnego (ciągłym i izotropowym), gdzie poza grawitacją nie ma innych obciążeń, jest to stan osiowosymetryczny, a na wartość występujących naprężeń wpływ mają trzy czynniki:

- ciężar objętościowy ośrodka,
- głębokość rozpatrywanego punktu w odniesieniu do powierzchni,
- współczynnik Poissona rozpatrywanego ośrodka [20].

Dwa pierwsze czynniki są łatwe do określenia. Warstwy nadległe nad rozpatrywaną elementarną cząstką górotworu w rzeczywistości zbudowane są z pakietu skał o zróżnicowanym ciężarze objętościowym. Dlatego przy określaniu wartości pierwotnego naprężenia pionowego w górotworze na głębokości *H* (przyjętym poziomie obliczeniowym) należy uwzględnić sumę iloczynów grubości (miąższości) poszczególnych warstw nadkładu $h_i$ i ich ciężarów objętościowych $\gamma_i$ [20,29]. Wówczas naprężenie pionowe w górotworze określa się na podstawie wzoru:

$$\sigma_z = \sum_{i=1}^{n} \gamma_i \cdot h_i \tag{6}$$

gdzie:

$\sigma_z$ - naprężenie pionowe, [MPa],
$\gamma_i$ - ciężar objętościowy skały w i-tej warstwie, [$MN/m^3$],
$h_i$ - grubość i-tej warstwy skalnej, [m].

W pewnych warstwach gruntowych w masywie górotworu mogą występować poziomy wodonośne (o zwierciadłach wód napiętych lub swobodnych), co będzie miało wpływ na ciężar skał nadległych. W takim przypadku należy uwzględnić wartość ciężaru objętościowego skały zawodnionej oraz siłę wyporu cieczy [29].

Trzeci czynnik, który decyduje o wartości naprężeń poziomych, czyli współczynnik Poissona, wprowadza poważne komplikacje. Charakteryzuje on sprężyste własności danego ośrodka i określa jego zdolność do odkształceń poprzecznych w stosunku do kierunku działania naprężenia. Współczynnik Poissona jest wyznaczany laboratoryjnie. Jego wartość dla tego samego materiału skalnego jest zmienna (rys. 2) i zależy od obciążenia, a tym samym od głębokości lokalizacji danej skały w stosunku do powierzchni skorupy ziemskiej [12,13,20]. Wraz ze wzrostem obciążenia (badania laboratoryjne oraz pomiary *in-situ* przeprowadzone przez Brown'a i Hoek'a w 1978 r. oraz Hergeta w 1988 r.), co można interpretować ze wzrostem głębokości zalegania, współczynnik ten przybiera większe wartości [1,6] choć z podstaw założeń teoretycznych dla takiego sposobu obliczenia pierwotnych naprężeń poziomych parametr ten jest niezależny od głębokości. Generalnie przyjmuje się, że na małych głębokościach liczba Poissona *m*, którą można wyznaczyć za pomocą wyrażenia:

$$m = \frac{1}{v} \tag{7}$$

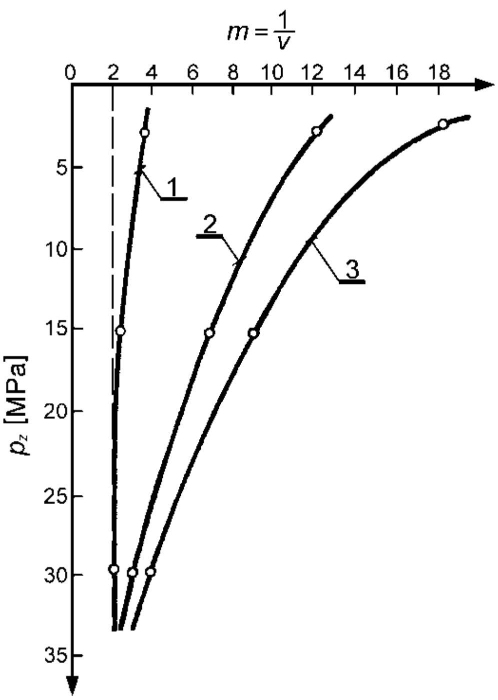
gdzie:

m - liczba Poissona, [-],
v - współczynnik Poissona, [-],

jest większa, a stan naprężeń jest zbliżony do jednokierunkowego ściskania [12,19,20]. W miarę wzrostu głębokości liczba Poissona *m* maleje, a stan

naprężeń przybiera formę prawdziwie trójosiowego ściskania. Po osiągnięciu pewnej granicznej głębokości, przy której *m* = 2, występuje ciśnienie izotropowe. Sytuacja taka ma miejsce wówczas, gdy wyznaczony współczynnik Poissona dla danego materiału skalnego przyjmuje wartość graniczną równą 0,5, co charakteryzuje materiał idealnie plastyczny i nieściśliwy. Zatem trójosiowy stan naprężeń w górotworze w swoim granicznym przypadku (bardzo dużej głębokości) jest stanem hydrostatycznym. W literaturze stan hydrostatyczny dla górotworu nazywany jest stanem litostatycznym [19]. Można go wyznaczyć za pomocą wzoru:

$$\sigma_z = \sigma_x = \sigma_y = \sum_{i=1}^{n} \gamma_i \cdot h_i \tag{8}$$




1 – węgiel, 2 – łupek, 3 – piaskowiec

Rys. 2. Wpływ ciśnienia na wartość liczby Poissona [20]

Zgodnie ze wzorami (1) i (3) naprężenia pierwotne w górotworze wzrastają z głębokością. Wartość naprężenia poziomego $\sigma_x$ oraz $\sigma_y$ oprócz głębokości, zależy również od współczynnika Poissona. W związku z powyższym, na różnych głębokościach w górotworze naprężenia poziome mogą przyjmować zbliżone wartości.

## 2.2. Pierwotny stan naprężeń w górotworze z uwzględnieniem obciążeń pochodzenia tektonicznego

Dla niektórych warunków geotechnicznych masywu skalnego, przyjęcie założenia, że w górotworze oprócz sił grawitacyjnych nie ma innych obciążeń, może prowadzić do błędnego wyznaczenia wartości pola naprężeń. Liczne obserwacje wskazują, że naprężenia pierwotne w skałach skorupy ziemskiej są wynikiem sumowania się dwóch pól naprężeń:

– pola naprężeń grawitacyjnych, związanych z ciężarem skał nadległych,
– pola naprężeń tektonicznych, związanych z procesami tektonicznymi [12,13,19].

W wielu rejonach kuli ziemskiej naprężenia w skałach są sumą tensorową naprężeń pochodzenia grawitacyjnego i tektonicznych. Występuje wówczas stan naprężeń, w którym wartości naprężeń głównych są różne i różna jest orientacja ich osi [13]. Naprężenia tektoniczne mogą pochodzić częściowo ze współczesnych, głównie poziomych nacisków w skorupie ziemskiej (naprężenia neotektoniczne związane m.in. z ruchami płyt kontynentalnych), a częściowo z naprężeń residualnych, czyli pozostałości po dawnych naciskach w masywie skalnym podczas tworzenia się masywów górskich w okresach orogenez [19].

Przyjęcie modelu obciążeniowego górotworu, który nie podlegał i nie podlega działaniu sił tektonicznych jest podejściem silnie wyidealizowanym i nierzadko słabo związanym z rzeczywistością geologiczno-górniczą. W wybranych rejonach na powierzchni Ziemi dokumentowane są struktury tektoniczne w postaci spękań kompresyjnych (od sił ściskających) lub tensyjnych (od sił rozciągających) wskazujące na działanie złożonego układu naprężeń, z różnymi korelacjami między składową pionową i składowymi poziomymi.

Wpływ naprężeń grawitacyjnych i tektonicznych na pole naprężeń pierwotnych w górotworze spowodował opracowanie wielu wzorów empirycznych do wyznaczania wartości składowej poziomej naprężenia [2]. Jednak w zależności od budowy geologicznej i aktywności tektonicznej górotworu wyróżnia się dwa równania empiryczne:

– równanie N. K. Bulina (dla obszarów geostatycznych),
– równanie N. Hasta (dla obszarów geodynamicznych).

Do obszarów geostatycznych zalicza się płasko zalegające grube serie skał osadowych, nie zdeformowane tektonicznie i spoczywające na wielkich płytach kontynentalnych oraz silnie strzaskane tektonicznie skały paleozoiczne pasm fałdowych i międzypłytowe obszary spękań kontynentalnych [19]. Badania naprężeń prowadzone na tych obszarach wykazały, że wartość pionowej składowej $\sigma_z$ jest bliska wartości naprężenia grawitacyjnego $\sigma_{z\ graw}$ i wynosi:

$$\sigma_z = (1{,}0 \div 1{,}2) \cdot \sigma_{z\,graw} \tag{9}$$

gdzie:

$\sigma_z$ - naprężenie pionowe dla obszarów geostatycznych, [MPa],
$\sigma_{zgraw}$ - naprężenie pionowe pochodzące od sił grawitacyjnych, [MPa].

Równanie empiryczne N. K. Bulina opracowane zostało na podstawie danych pochodzących z pomiarów naprężeń w górotworze [19]. Przyjmuje się, że średnia wartość normalnego naprężenia poziomego $\sigma_{Bx,y}$ rośnie wraz z głębokością $H$ i oblicza się ją na podstawie wzoru:

$$\sigma_{Bx,y} = 2{,}50 + 0{,}013 \cdot H \tag{10}$$

gdzie:

$\sigma_{Bx,y}$ - naprężenie poziome dla obszarów geostatycznych, [MPa],
H - głębokość dla której wyznacza się naprężenie poziome, [m].

Określone wzorem N. K. Bulina (10) średnie naprężenie poziome w górotworze jest na ogół większe od naprężeń $\sigma_x$, $\sigma_y$, wyznaczanych za pomocą zależności (3) i wynikających tylko z sił grawitacyjnych. Wzory N. K. Bulina (wzór 9 i 10) mają zastosowanie dla obszaru LGOM, jako obszaru geostatycznego.

Obszary geodynamiczne charakteryzują się przeważnie złożoną budową geologiczną, dużymi upadami warstw i obecnością współczesnych ruchów tektonicznych. Należą do nich także niektóre rejony o spokojnej tektonice, lecz cechujące się występowaniem współczesnych sił podnoszenia tektonicznego [19]. Na podstawie danych pomiarowych naprężenia pionowe dla obszarów geodynamicznych mają najczęściej wartości:

$$\sigma_z = (1{,}5 \div 3{,}8) \cdot \sigma_{z\,graw} \tag{11}$$

gdzie:

$\sigma_z$ - naprężenie pionowe dla obszarów geodynamicznych, [MPa],
$\sigma_{zgraw}$ - naprężenie pionowe pochodzące od sił grawitacyjnych, [MPa].

Sformułowane przez N. Hasta równanie empiryczne oparte jest na wynikach licznych pomiarów składowej poziomej stanu naprężenia w obszarach geodynamicznych [19]. Średnie naprężenie poziome $\sigma_{Hx,y}$ określa się w funkcji głębokości *H:*

$$\sigma_{Hx,y} = 9{,}31 + 0{,}05 \cdot H \tag{12}$$

gdzie:

$\sigma_{Hx,y}$ - naprężenie poziome dla obszarów geodynamicznych, [MPa],
H - głębokość dla której wyznacza się naprężenie poziome, [m].

Pomiędzy wyznaczanymi wartościami pierwotnych naprężeń poziomych w górotworze nie objętym robotami górniczymi zachodzi relacja:

$$\sigma_{x,y\,graw} < \sigma_{Bx,y} < \sigma_{Hx,y} \tag{13}$$

gdzie:

- $\sigma_{x,ygraw}$ - naprężenie poziome pochodzące od sił grawitacyjnych, [MPa],
- $\sigma_{Bx,y}$ - naprężenie poziome dla obszarów geostatycznych, [MPa],
- $\sigma_{Hx,y}$ - naprężenie poziome dla obszarów geodynamicznych, [MPa].

Oznacza to, że wartość średniego naprężenia poziomego obliczona za pomocą wzoru N. Hasta (12) jest większa od wartości otrzymywanych za pomocą wzoru N. K. Bulina (10) oraz naprężeń poziomych pochodzących tylko od sił grawitacyjnych i wyznaczanych na podstawie wzoru (3).

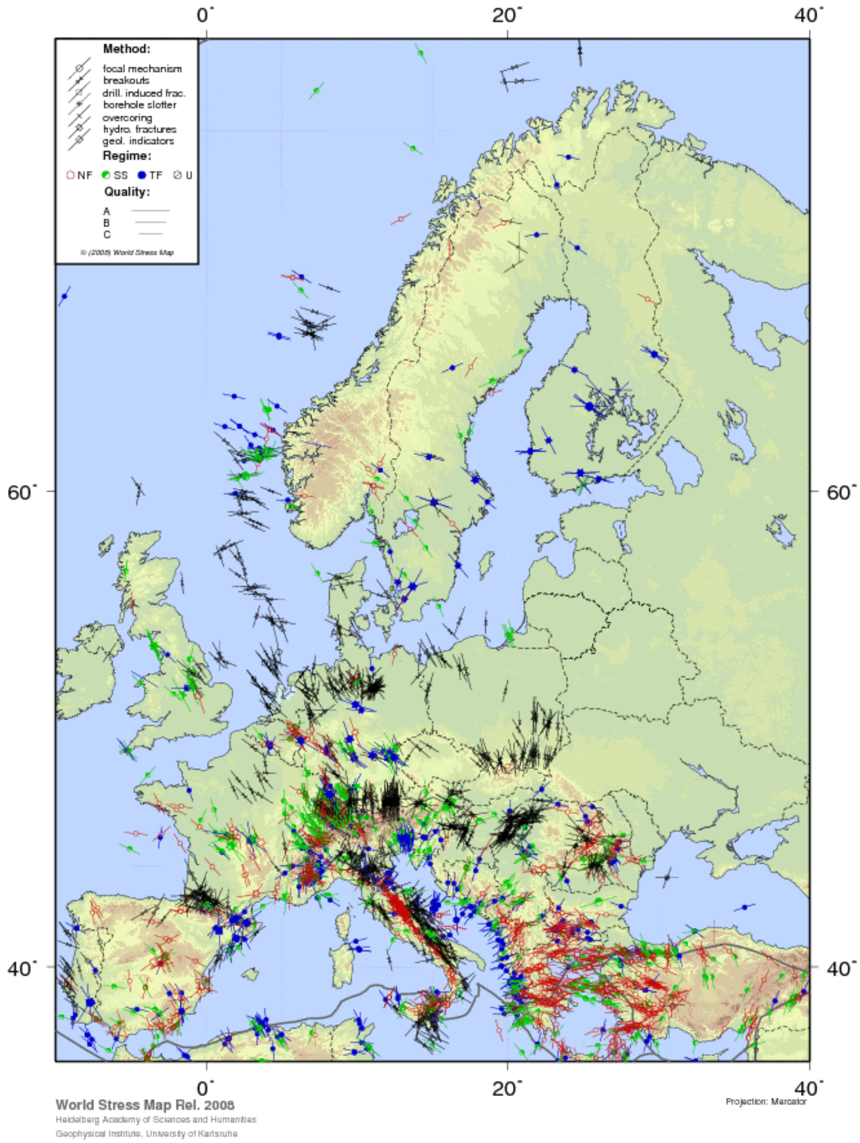
W rejonach aktywnych tektonicznie, w różnych miejscach na Ziemi, stwierdzono występowanie naprężeń poziomych większych od pionowych. Badania wykazały, iż z sytuacją taką należy liczyć się w rejonach geosynklin oraz na obrzeżu płyt kontynentalnych i oceanicznych (Kanada, Australia, Indie, Kamczatka), natomiast w skałach zalegających na płytach może dominować litostatyczny stan naprężeń [13].

Relacja jaka istnieje między pomierzonymi naprężeniami poziomymi (maksymalnym $\sigma_H$ i minimalnym $\sigma_h$) oraz pionowym $\sigma_z$, zgodnie z teorią E. M. Andersona z 1951 r. [14] została wykorzystana w 1994 r. przez S. Z. Yu do scharakteryzowania pola naprężeń pierwotnych w danym rejonie. Zgodnie z tą klasyfikacją: jeżeli $\sigma_z > \sigma_H > \sigma_h$ wówczas pole naprężeń ma charakter obciążeń statycznych (od sił grawitacji), jeżeli $\sigma_H > \sigma_z > \sigma_h$ lub $\sigma_H > \sigma_h > \sigma_z$, wówczas pole naprężeń ma charakter obciążeń pochodzenia dynamicznego (tektonicznego).

Jednym z najważniejszych międzynarodowych przedsięwzięć w tematyce obejmującej rozpoznanie układu naprężeń w górotworze jest ogólnoświatowy program badań – projekt WSM (World Stress Map) rozpoczęty w 1995 r. [32]. Koncepcja uruchomienia tego programu badawczego powstała w 1986 r. w ramach Międzynarodowego Programu Badań Litosfery. Projekt WSM polega na zbieraniu z całej kuli ziemskiej informacji o kierunkach działania współczesnych naprężeń pochodzenia tektonicznego w litosferze (skorupie ziemskiej). Aktualnie projekt ten kontynuowany i nadzorowany jest przez Helmholtz Centre Potsdam – GFZ niemieckie, geofizyczne centrum badawcze [32].

Dane pozyskane są różnymi metodami: w skali makrogeologicznej (metoda wskaźników struktur geologicznych, interpretacji wulkanologicznych), interpretacji geofizycznej (rozpoznanie mechanizmu ogniska wstrząsu – około 70% danych), otworowymi (szczelinowanie hydrauliczne). Wyniki pomiarów aktualizowane są do dnia dzisiejszego i na koniec 2008 r. ich liczba przekroczyła 20 000 w skali całej kuli ziemskiej.

Dzięki poszukiwaniu i dokumentowaniu złóż roponośnych największą ilość danych dla Polski pozyskano z południowo-wschodniej części kraju. W Karpatach ma miejsce generalnie wachlarzowaty rozkład naprężeń wokół całego pasma [18].




Rys. 3. Kierunki działania największych naprężeń głównych w obrębie skorupy ziemskiej dla obszaru Europy na podstawie Mapy Światowej Naprężeń [35]

Posługiwanie się danymi z Mapy Światowej Naprężeń (rys. 3) może dać jedynie ogólne informacje o regionalnym polu naprężeń tektonicznych. Wadą tak pozyskanych danych jest niewielki zasób informacji pochodzących

z bezpośrednich pomiarów wykonywanych metodami hydraulicznymi lub metodami rdzeniowania. Z badań przeprowadzonych technikami najczęściej stosowanymi w praktyce górniczej i geotechnicznej pochodzi mniej, niż co dwudziesta informacja [32].

## 2.3. Pierwotny stan naprężeń w górotworze wyznaczany na podstawie pomiarów

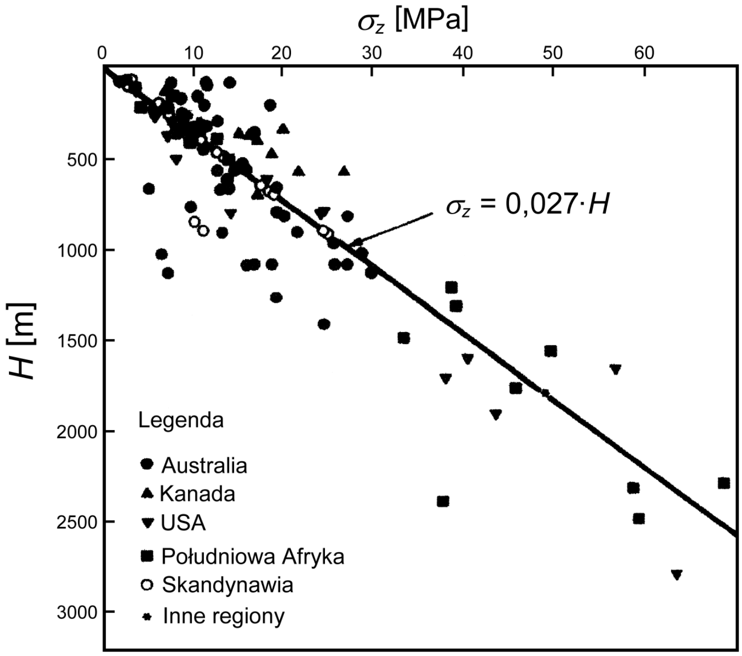
Zastosowanie metod pomiarowych do wyznaczania wartości i kierunków naprężeń w masywach skalnych pozwala zweryfikować poglądy na temat pierwotnego pola naprężeń w górotworze. Na podstawie dotychczas zrealizowanych pomiarów naprężeń pionowych na kuli ziemskiej wydaje się bezspornym, iż wraz ze wzrostem głębokości wzrastają naprężenia pionowe w górotworze, natomiast jest to spostrzeżenie mające ogólny (generalny) charakter.

Zaznaczyć należy, że już w 1955 r. prof. A. Sałustowicz poddaje rozważaniom możliwość występowania naprężeń pierwotnych poziomych o wartości dominującej nad naprężeniami pionowymi. Z końcem lat pięćdziesiątych opublikowano wyniki pomiarów naprężeń poziomych w górach skandynawskich. Wskazywały one, iż naprężenia poziome są kilkukrotnie większe od pionowych, przez co zostały przyjęte bardzo sceptycznie. Podważało to podstawowe prawa teorii sprężystości stosowane jako „pewnik” w stosunkowo młodej nauce – mechanice górotworu. Dotychczas wykonane pomiary *in-situ* w kopalniach podziemnych na wybranych kontynentach wskazują, iż wielkości naprężenia pierwotnego, poziomego mogą przewyższać składową pionową [8, 11, 13, 14, 15, 16], a wyniki „pomiarów skandynawskich" z lat pięćdziesiątych mogą być w pełni uzasadnione.

W przedsięwzięciach górniczych celowe jest stosowanie metod pomiarowych do wyznaczania naprężeń pierwotnych. Najczęściej w warunkach dołowych wykorzystuje się:

1) metody hydrauliczne:
   - prowokowanie pęknięcia za pomocą hydraulicznego rozpierania otworów wiertniczych,
   - rozwieranie istniejącego pęknięcia w otworze wiertniczym za pomocą hydraulicznego rozparcia,
2) metody odprężeniowe:
   - metody trepanacyjne
     - ANZI (cela australijsko-nowozelandzka, 3-osiowy pomiar),
     - CSIR (cela południowoafrykańska, 3-osiowy pomiar),
     - CSIRO HI (cela australijska, 3-osiowy pomiar),
     - Doorstopper (cela południowoafrykańska, 2-osiowy pomiar),
     - USBM (cela amerykańska, 2-osiowy pomiar),
   - metody szczelinowania,
3) metody stosujące podnośniki hydrauliczne.

W wyniku zrealizowanych pomiarów przez E. T. Brown'a i E.Hoek'a w 1975 r. [15,16] wskazano (rys. 4), iż wartości naprężeń pionowych np. w rejonie Południowej Afryki wynoszą około 40 MPa dla zarówno głębokości 1000 m i 2500 m, nie mniej wartości tego naprężenia wynoszące 60-70 MPa występowały jedynie na głębokości 2500 m i większej [13,16].




Rys. 4. Naprężenia pionowe w litosferze w różnych rejonach Ziemi w funkcji głębokości [13,15]

Na podstawie badań w wybranych rejonach kuli ziemskiej E. Hoek aproksymuje zmianę wartości pierwotnych naprężeń pionowych względem głębokości do linowej funkcji postaci:

$$p_x = 0{,}027 \cdot H \tag{14}$$

gdzie:

$p_x$ - pierwotne naprężenie pionowe, [MPa],

H - głębokość dla której wyznacza się pierwotne naprężenie pionowe, [m]

i tym samym przyjmuje on, iż średni ciężar objętościowy mas w skorupie ziemskiej wynosi 0,027 MN/m$^3$.

Z sześciu składowych tensora naprężenia pierwotnego tylko składowa pionowa może być z dużym prawdopodobieństwem określona jako ciśnienie słupa warstw nadległych. Naprężenia wyznaczane na podstawie bezpośrednich pomiarów dołowych pozwalają zweryfikować wartości naprężeń pionowych $\sigma_z$ i poziomych $\sigma_{x,y}$ obliczanych za pomocą zależności (3), którą często stosowano w rozwiązywaniu różnorodnych zagadnień mechaniki skał. Wyniki wielu badań *in-situ* dotyczących składowych tensora pierwotnego stanu naprężenia w górotworze pozwalają stwierdzić, że bezkrytyczne stosowanie wzoru (3) może powodować błędy w obliczeniach inżynierskich.

Na podstawie licznych obserwacji i pomiarów prowadzonych w różnych rejonach świata można stwierdzić, że wartość pierwotnych naprężeń poziomych może być większa od przyjmowanych dotychczas wartości, uzależnionych tylko od współczynnika Poissona $\nu$ [8,11,13,14,15,16]. Ich intensywność jest funkcją:

– wzajemnych oddziaływań na siebie poszczególnych jednostek tektonicznych,
– ukształtowania powierzchni terenu,
– zaawansowania tektonicznego górotworu,
– głębokości w górotworze,
– sztywności materiału skalnego, wyrażonej m.in. poprzez współczynnik Poissona $\nu$ i moduł sztywności liniowej *E*.

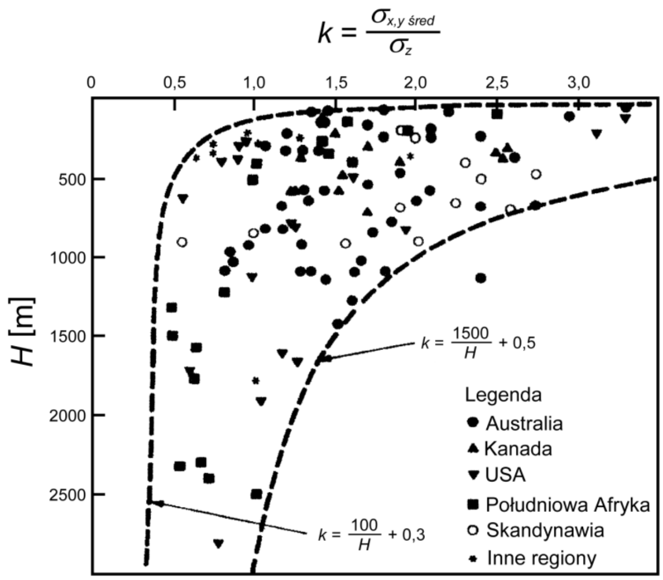
Analiza naprężeń poziomych wyznaczanych dzięki pomiarom dokonywanym w różnych miejscach świata wskazuje, że stosunek średnich naprężeń poziomych $\sigma_{x,y\ \acute{s}red}$ do naprężeń pionowych $\sigma_z$, wyznaczany za pomocą zależności:

$$k = \frac{\sigma_{x,y\,sred}}{\sigma_z} \tag{15}$$

gdzie:

k - wskaźnik porównawczy wartości średnich naprężeń poziomych do wartości naprężeń pionowych, [-],
$\sigma_{x,y\acute{s}red}$ - średnie naprężenie poziome, [MPa],
$\sigma_z$ - naprężenie pionowe, [MPa],

zmienia się wraz z głębokością i osiąga największe wartości dla płytkich lokalizacji (rys. 5). Na większych głębokościach zakres zmienności maleje, a składowa naprężenia poziomego nie przekracza wartości składowej pionowej naprężenia pierwotnego (k = 0,5÷1,0).




Rys. 5. Wartość wskaźnika *k* w funkcji głębokości [13,16]

Na podstawie badań i pomiarów realizowanych przez Sheorey'a w 1994 r. [16] wskazano, iż wartości pomierzonych naprężeń poziomych są większe od pionowych oraz rejestrowane są różne wartości składowych *x* i *y* naprężeń poziomych. Opracował on zależność empiryczną naprężeń pierwotnych poziomych i pionowych w relacji:

$$k = 0{,}25 + 7 \cdot E_s \cdot \left( 0{,}001 + \frac{1}{H} \right) \tag{16}$$

gdzie:

k - wskaźnik porównawczy wartości średnich naprężeń poziomych do wartości naprężeń pionowych [-],

$E_s$ - moduł deformacyjny mierzony w kierunku poziomym, [GPa],

H - głębokość poziomu dla którego przeprowadza się obliczenia, [m].

Pierwsze pomiary w warunkach polskich kopalń podziemnych zrealizowano w kopalni rud miedzi Rudna w 1996 r. W górnictwie światowym takie badania były prowadzone znacznie wcześniej. Doświadczenia te wskazują, iż wartości maksymalnych naprężeń poziomych mogą być wyraźnie większe, niż wartości uzyskiwane na podstawie obliczeń teoretycznych (przeprowadzanych za pomocą wzorów: 3, 6, 9 i 10) dla zadanych głębokości i rosną one wraz z głębokością.

## 3. Problemy z utrzymaniem stateczności wyrobisk górniczych drążonych w polu wzmożonych naprężeń poziomych

Po wykonaniu pojedynczego wyrobiska w górotworze ustala się wtórny stan naprężenia. Jego charakter zależny jest od istniejącego wcześniej układu pierwotnego naprężeń (stosunku między składową poziomą i pionową naprężenia) i geometrii przekroju poprzecznego wyrobiska. Wpływ działania naprężeń poziomych o znacznych wartościach na stateczność wyrobisk górniczych może się przejawiać powstawaniem zawałów stropów na skutek ich poziomego nadmiernego ściskania [34, 35].

Potwierdziły to doświadczenia światowego górnictwa (m.in. w Kanadzie, Stanach Zjednoczonych, Australii i Wielkiej Brytanii). Skutki niewystarczającego rozpoznania wielkości i kierunków naprężeń w masywie górotworu były nierzadko katastrofalne dla stateczności wyrobisk górniczych (rys. 6), które wydrążono w strefie wpływu wzmożonych naprężeń poziomych. Stwierdzono, że w wyrobiskach wykonywanych w takich warunkach występowały problemy z utrzymaniem stateczności obudowy górniczej.



Rys. 6. Zawał stropu bezpośredniego na skutek działania znacznych obciążeń poziomych w kopalni White Pine, USA [1]

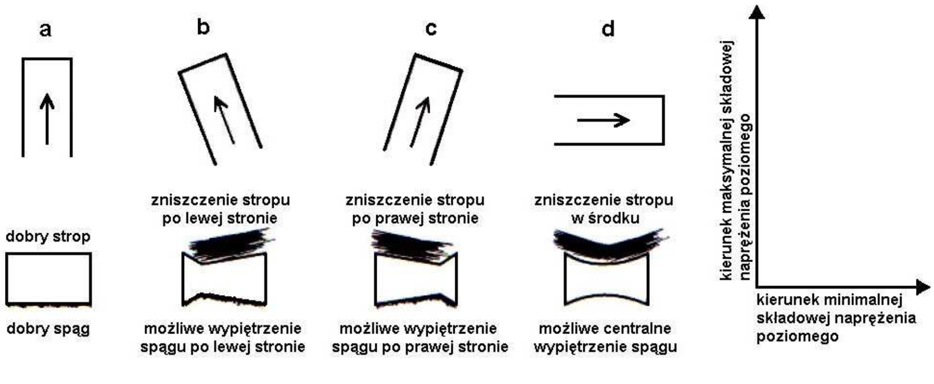
Zastosowanie technik pomiarowych do wyznaczania wartości i kierunków naprężeń poziomych w warunkach *in-situ* oraz obserwacje dołowe w kopalniach pozwoliły wyjaśnić szereg zjawisk zachodzących w wyrobiskach górniczych, takich jak:

- zawały mocnych skał stropowych bez ewidentnej przyczyny,
- wyłamywanie stropów do wyrobisk kopalnianych (rys. 7),
- wypiętrzanie spągów,
- odspajanie się fragmentów ociosów,
- niszczenie obudowy górniczej.



Rys. 7. Destrukcja stropu wyrobiska górniczego na skutek działania wzmożonych naprężeń poziomych [25]

Problemy z utrzymaniem stateczności obudowy górniczej, wymusiły zweryfikowanie w światowym górnictwie zasad projektowania i wykonywania wyrobisk górniczych. Na podstawie obserwacji dołowych stwierdzono, że w prawie każdym przypadku wystąpienia problemów ze statecznością wyrobiska, składowa pozioma naprężeń w górotworze była większa, czasami nawet kilkakrotnie, niż składowa pionowa [8,23,24,25]. Taka proporcja pomiędzy wartościami naprężeń w rejonie prowadzonych robót górniczych była przyczyną utraty stateczności przez wyrobiska kopalniane. Dodatkowo okazało się, że istnieje ścisły związek między kierunkiem drążenia wyrobiska korytarzowego i kierunkiem działania składowych naprężeń poziomych, a statecznością wyrobiska (rys. 8).




Rys. 8. Wpływ kierunku naprężeń poziomych na stateczność wyrobisk górniczych [6,7,33]

Obserwacje dołowe w brytyjskich kopalniach potwierdziły, że najkorzystniejsza sytuacja jest wtedy, gdy kierunek działania największej składowej wzmożonych naprężeń poziomych jest równoległy do dłuższej osi symetrii wyrobiska korytarzowego. Wówczas w wyrobisku nie dochodzi do utraty stateczności na skutek działania naprężeń poziomych (rys. 8 a). W przypadku prowadzenia wyrobisk pod kątem do kierunku największej składowej naprężenia poziomego, może następować zniszczenie stropu i wypiętrzenie spągu przy lewym lub prawym ociosie (rys. 8 b, c). Gdy kierunek największej składowej jest prostopadły do kierunku drążenia wyrobiska, wówczas występuje najbardziej niekorzystna sytuacja utraty stateczności (rys. 8 d). Na środku wyrobiska dochodzi do zawału stropu i wypiętrzenia spągu [6, 7, 33]. W kopalniach podziemnych w Wielkiej Brytanii pomiar naprężeń *in-situ* jest jednym z najistotniejszych czynników mających wpływ na poprawę uwarunkowań stropowych przy zastosowaniu obudowy kotwowej. Rozpoznanie wpływu maksymalnego naprężenia poziomego na stateczność wyrobisk górniczych w układzie, w którym naprężenia poziome są większe od pionowego, okazał się głównym czynnikiem decydującym o sukcesie zastosowania obudowy kotwowej. Sposób doboru kierunku drążenia wyrobisk w oparciu o kierunek działania siły powodującej największe naprężenie poziome nazwano w Wielkiej Brytanii „górnictwem kierunkowym" [5].

Analizy numeryczne stateczności wyrobisk górniczych za pomocą programów komputerowych, opartych na metodzie elementów skończonych, potwierdziły wpływ kierunku naprężeń poziomych na stateczność wyrobisk górniczych [28]. Symulacje komputerowe przeprowadzone dla górotworu, jako ośrodka sprężysto-idealnie plastycznego z osłabieniem oraz przy przyjętym następującym założeniu:

$$\sigma_H > \sigma_z > \sigma_h \tag{17}$$

gdzie:

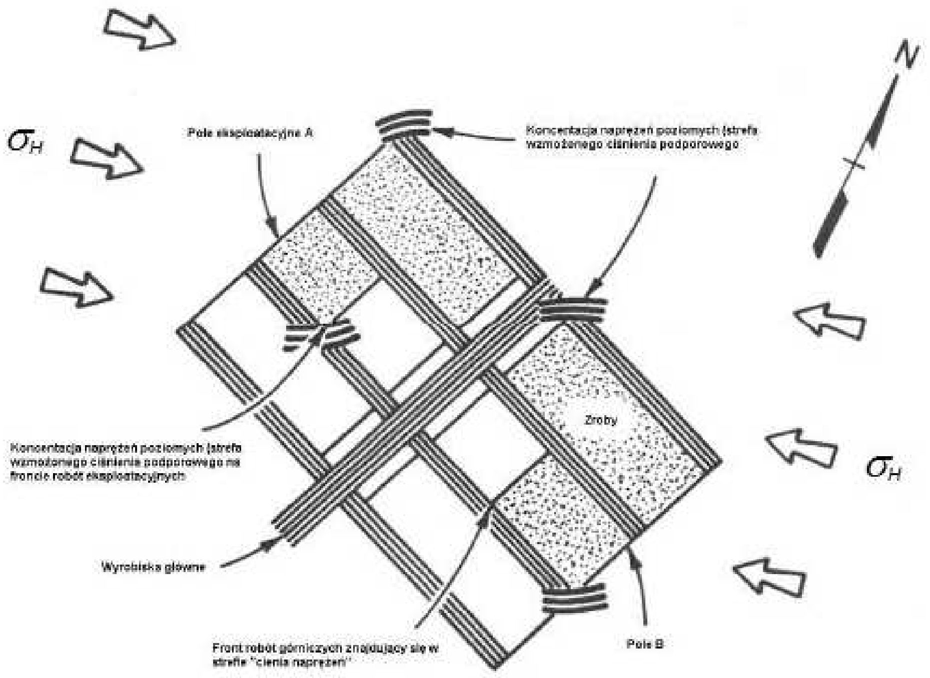
$\sigma_H$ - maksymalna składowa naprężenia poziomego, [MPa],
$\sigma_z$ - składowa naprężenia pionowego, [MPa],
$\sigma_h$ - minimalna składowa naprężenia poziomego, [MPa]

wykazały, że:

– skały uległy odprężeniu i uplastycznieniu generalnie w całej strefie wokół wyrobiska, natomiast strefa ma większy zasięg, gdy maksymalna składowa naprężenia poziomego $\sigma_H$ skierowana jest prostopadle do dłuższej osi wyrobiska korytarzowego,
– jeśli minimalna składowa naprężenia poziomego $\sigma_h$ skierowana jest prostopadle do dłuższej osi wyrobiska korytarzowego, to występują mniejsze wypiętrzenia spągów oraz przemieszczenia skał w stropie i ociosach, niż dla przypadku, gdy maksymalna składowa naprężenia poziomego $\sigma_H$ jest skierowana prostopadle do osi wyrobiska górniczego [28].

Wyniki symulacji komputerowych są generalnie zgodne z obserwacjami prowadzonymi m.in. w amerykańskich i australijskich kopalniach podziemnych.

W latach 90-tych XX wieku w Stanach Zjednoczonych prowadzono w szerokim zakresie badania wpływu poziomych naprężeń na stateczność podziemnych wyrobisk górniczych. Analizowano szczególnie ścianową technologię eksploatacji złóż węgla kamiennego [22,23,24,25]. Na podstawie obserwacji dołowych stwierdzono obszary koncentracji poziomych naprężeń w narożnikach prostokątnych pól eksploatacyjnych (rys. 9).




Rys. 9. Koncentracja naprężeń poziomych w wyrobiskach ścianowych [22]

Dalsze badania oraz symulacje numeryczne wskazywały, że miejsce koncentracji naprężeń zależy od:

- wartości kąta zawartego między kierunkiem działania wzmożonych naprężeń poziomych w górotworze i czołem ściany wydobywczej,
- położenia zrobów wyeksploatowanych pól względem czynnej ściany.

Zatem postać układu naprężeń w górotworze, w którym prowadzona jest eksploatacja górnicza będzie zależała od istniejących warunków w układzie pierwotnym (przed rozpoczęciem robót górniczych) oraz od geomechanicznych uwarunkowań prowadzonej eksploatacji m.in. sąsiedztwa zrobów, kierunku postępu eksploatacji względem stref nieupodatnionych i in.

Analizy komputerowe przeprowadzone za pomocą programu AHSM 2.0 (przeznaczonego do wyznaczania koncentracji naprężeń poziomych w wyrobiskach przyścianowych) dla różnych wariantów systemów ścianowych podłużnych i systemów ścianowych poprzecznych, stosowanych w warunkach polskiego górnictwa, potwierdziły przypuszczenia, że położenie zrobów względem ściany wydobywczej ma istotny wpływ na wielkość koncentracji naprężeń poziomych w wyrobiskach ścianowych [27].

Zarówno obserwacje rzeczywistych przypadków dołowych w kopalniach na świecie, jak i symulacje komputerowe z wykorzystaniem metod numerycznych (MES, MEB, MRS) pozwoliły sformułować następujące zasady dotyczące oddziaływania naprężeń poziomych na wyrobiska górnicze:

- wyrobiska korytarzowe, drążone równolegle do kierunku działania większej składowej naprężeń poziomych, są mniej narażone na ich niekorzystne oddziaływanie, niż wyrobiska drążone prostopadle,
- ze względów bezpieczeństwa, kierunki postępów frontów pól eksploatacyjnych powinny być orientowane równolegle do kierunku dominującej wartości naprężenia poziomego,
- obszary zrobów obejmujących gruzowiska skalne, są przyczyną powstawania lokalnych stref koncentracji naprężeń poziomych, jak i stref odprężenia, w zależności od orientacji kierunku wybierania złoża w polu względem kierunków działania naprężeń głównych.

W polskim górnictwie, przed zaprojektowaniem rozmieszczenia wyrobisk kopalnianych i doborem ich obudowy, nie prowadzi się rozpoznania kierunków i wartości pierwotnych naprężeń poziomych w górotworze.

Dla złoża rud miedzi w rejonie LGOM, eksploatowanego systemami komorowo-filarowymi, M. Fabjanczyk w 1996 roku sformułował pogląd, że obszary koncentracji poziomych naprężeń występują w narożnikach prostokątnych pól eksploatacyjnych [9,10,30]. Założył, że istnieje wysokie prawdopodobieństwo uwidocznienia się w kopalniach KGHM Polska Miedź S.A. wpływów działania składowej poziomej naprężenia o znacznej wartości. Tego rodzaju poziome obciążenia są czynnikiem wpływającym na stateczność stropów wyrobisk górniczych [3,10], a kształtowane są one zarówno przez istniejący układ naprężeń pierwotnych w tym rejonie oraz przez obecnie rozpoznane pole naprężeń. Zatem od dłuższego czasu rozpoznanie kierunków i wartości naprężeń głównych w zakładach górniczych KGHM Polska Miedź S.A. było przedmiotem okresowych analiz mających na celu określenie wpływu naprężeń poziomych na stateczność wyrobisk górniczych. Warto zaznaczyć, iż dotychczasowe doświadczenia kopalń LGOM przy eksploatacji złoża rud miedzi wskazują, że dokonana zmiana kierunku postępu frontu eksploatacyjnego wpływa wyraźnie na stateczność stropów (poprawia lub pogarsza te warunki) w określonych sytuacjach geologiczno-górniczych [8].

## 4. Sposoby przeciwdziałania wpływom wzmożonych naprężeń poziomych stosowane w górnictwie światowym

Podejmowana eksploatacja górnicza w trudnych warunkach geotechnicznych powodowała problemy ze statecznością wyrobisk kopalnianych. Obserwacje dołowe m.in. w kopalniach amerykańskich, angielskich i australijskich potwierdziły występowanie związku między kierunkiem drążenia wyrobisk korytarzowych oraz statecznością wyrobisk, a kierunkiem działania naprężeń poziomych w danym rejonie. Na podstawie zaobserwowanych zależności opracowano kilka rozwiązań profilaktycznych:

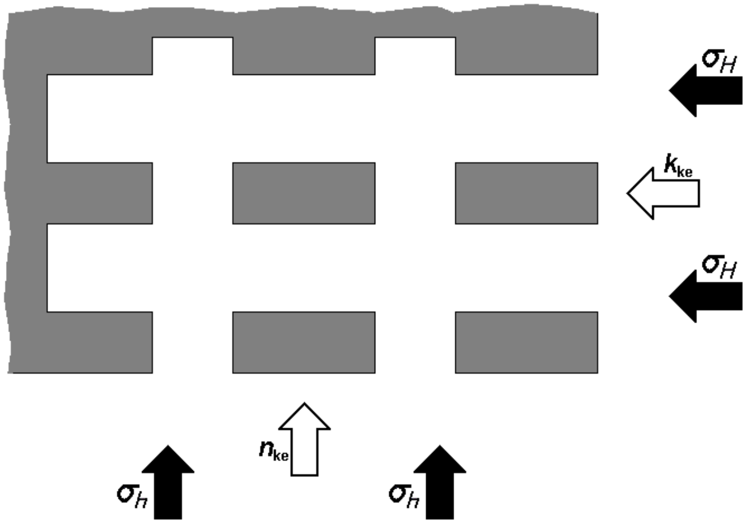
– zasady górnictwa kierunkowego,
– mapowanie naprężeń w górotworze,
– zasady drążenia wyrobisk górniczych w strefie tzw. „cienia naprężeniowego",
– potencjał naprężeń poziomych PNP.

### 4.1. Górnictwo kierunkowe

Zasady górnictwa kierunkowego [7,31] polegają na prowadzeniu w górotworze, w którym panuje wzmożony stan naprężeń poziomych, wyrobisk korytarzowych równolegle do kierunku działania największej składowej naprężenia poziomego. Przeprowadzone obserwacje dołowe rzeczywistych przypadków utraty stateczności potwierdzają koncepcję górnictwa kierunkowego [25]. Pozwoliły również sformułować następujące zasady:

– wyrobiska drążone prostopadle do kierunku działania większej składowej naprężeń poziomych są bardziej narażone na ich niekorzystne oddziaływanie, niż wyrobiska drążone równolegle,
– naprężenia poziome nie mogą być transmitowane poprzez obszary zrobów i zawałów obejmujących gruzowiska skalne.

W kopalniach prowadzących eksploatację systemami filarowo-komorowymi na znacznych głębokościach zaproponowano, zgodnie z zasadami górnictwa kierunkowego, aby dłuższe boki filarów były usytuowane równolegle do kierunku działania największej składowej naprężenia poziomego [17,28,33]. Optymalny kierunek eksploatacji dla takiego rozwiązania powinien być zorientowany prostopadle do kierunku mniejszej składowej naprężenia poziomego (rys. 10). Taka zasada prowadzenia eksploatacji jest również korzystna z punktu widzenia bezpieczeństwa robót górniczych w warunkach zagrożenia tąpaniami.




Rys. 10. Zależność optymalnego kierunku eksploatacji w systemie komorowo-filarowym od kierunków pierwotnego stanu naprężenia,
oznaczenia: $\sigma_H$ – maksymalna składowa naprężenia poziomego, $\sigma_h$ – minimalna składowa naprężenia poziomego, $k_{ke}$ – korzystny kierunek eksploatacji, $n_{ke}$ – niekorzystny kierunek eksploatacji [28]

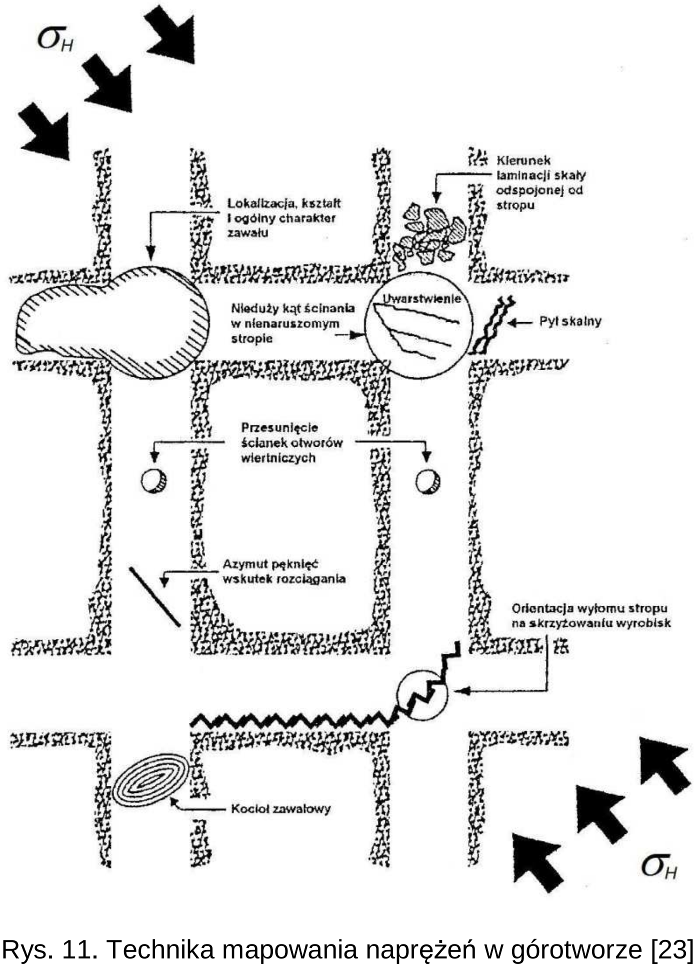
Przystosowanie komorowo-filarowych systemów do bezpiecznej eksploatacji w kopalniach KGHM Polska Miedź S.A. oparto na hipotezie wyprzedzającego spękania górotworu Labase'a i opracowanej dla warunków LGOM hipotezie pokrytycznej podporności filarów międzykomorowych [3,4]. Zgodnie z tymi hipotezami filary technologiczne wycinane z calizny pokładu komorami i pasami mogą być niszczone ciśnieniem eksploatacyjnym już na krawędzi calizny, jeśli mają odpowiednio małe wymiary. Calizna odkształconych filarów przechodzi w stan pokrytyczny (pozniszczeniowy), uzyskując strukturę słupowo-klinową. Dla jak największego upodatnienia calizny filary są usytuowane dłuższą osią prostopadle do linii frontu. Pozwala to zwiększyć ilość komór i ilość odpalanych przodków, przy zachowaniu odpowiedniej powierzchni filarów międzykomorowych.

Klasyczne systemy ścianowe węgla kamiennego wymagają, aby wyrobiska ścianowe oraz chodniki przyścianowe krzyżowały się ze sobą pod kątem zbliżonym do kąta prostego. Zgodnie z zasadami górnictwa kierunkowego dla takiej orientacji wyrobisk zapewnienie optymalnej lokalizacji jednego wyrobiska górniczego, względem kierunku największej składowej naprężeń poziomych, spowoduje pogorszenie stateczności drugiego wyrobiska. Panuje pogląd, że korzystniej jest właściwie ukierunkować wyrobiska przyścianowe, niż ścianę eksploatacyjną [21], gdyż problemy związane z naruszeniem stateczności obudowy w chodnikach nadścianowych i chodnikach podścianowych są znacznie trudniejsze do usunięcia, niż w innych wyrobiskach.

### 4.2. Mapowanie naprężeń w górotworze

Wyznaczenie wartości składowych pola naprężeń na podstawie pomiarów w kopalniach podziemnych jest bardzo kosztownym przedsięwzięciem. Na dokładność uzyskanych wyników wpływ mają również roboty górnicze i prowadzona eksploatacja w pobliżu miejsca pomiarowego.

W warunkach kopalnianych często dla poprawy stateczności wyrobisk górniczych ważniejsza jest znajomość kierunków największej i najmniejszej składowej naprężeń poziomych, niż ich wartości. Uwzględniając te czynniki opracowano na potrzeby górnictwa podziemnego w Stanach Zjednoczonych metodę mapowania naprężeń poziomych [23]. Metoda ta polega na obserwacji (monitoringu) zjawisk występujących w wyrobiskach kopalnianych, drążonych w strefie wzmożonych naprężeń poziomych (rys. 11).




Rys. 11. Technika mapowania naprężeń w górotworze [23]

Informacje z takiego rozpoznania górniczego w pewnym przedziale czasowym, pozwalają przenieść wyniki wnioskowania ze skali mikro na większy obszar górotworu, np. w odniesieniu do całego pola eksploatacyjnego i jego bliskiego sąsiedztwa. Zebranie informacji z prowadzonych obserwacji dołowych zaznacza się na mapach górniczych i przypisuje występującym zjawiskom konkretne przyczyny. Prowadzenie rzetelnej oceny zachowań górotworu (w danej kopalni lub regionie górniczym) w kontekście możliwych wpływów działania zwiększonych naprężeń poziomych pozwala w dłuższym horyzoncie czasowym na wypracowanie zasadniczych relacji między interpretacją występujących zjawisk a prawdopodobnym kierunkiem działania składowych naprężeń poziomych (tabela 1).

Tabela 1

Zasady mapowania naprężeń poziomych [23]

| **Zjawisko** | **Cecha** | **Związek z największą $\sigma_H$ i najmniejszą $\sigma_h$ składową naprężenia poziomego** |
|---|---|---|
| Wyłom w stropie | Lokalizacja w wyrobisku, szczególnie na skrzyżowaniach wyrobisk | Lokalizacja w wyrobiskach daje informacje o kącie pomiędzy kierunkiem drążenia i naprężeniami poziomymi. Na skrzyżowaniach wyłom jest równoległy do kierunku działania $\sigma_h$. |
| Pęknięcie przy rozciąganiu | Kierunek | Równolegle do $\sigma_H$. |
| Kotły zawałowe | Kierunek większej i mniejszej osi pustki | Większa oś powstałej pustki jest równoległa do $\sigma_h$. |
| Przesunięcia ścianek otworów wiertniczych | Kierunek ruchu stropu | Warstwy stropu przesuwają się równolegle do $\sigma_H$. |
| Płaszczyzny ścinania i pył skalny | Kierunek | Płaszczyzny ścinania i linie pyłu skalnego są równoległe do $\sigma_h$. |
| Laminacja skał stropu | Kierunek | Laminacja jest równoległa do $\sigma_H$. |
| Zawały stropu | Lokalizacja, kształt i ogólna charakterystyka | Lokalizacja pozwala wnioskować o ogólnym ukierunkowaniu pola naprężeń. Kątowy kształt zawału zazwyczaj wskazuje na działanie naprężeń poziomych uwidaczniające się stopniowym niszczeniem na skutek ścinania, przy czym intensywność uszkodzeń jest znacznie większa po jednej ze stron. |

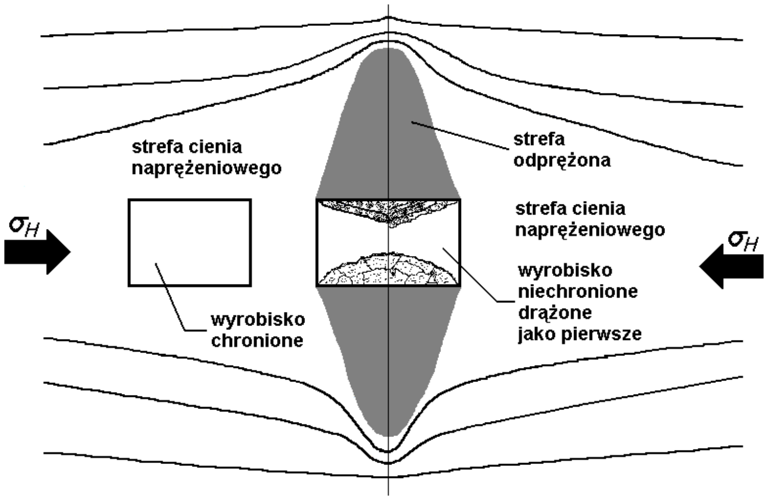
Metoda mapowania naprężeń nie wymaga dużych nakładów finansowych. Stosując ją można wyznaczyć w przybliżeniu kierunki składowych i względną wartość naprężeń poziomych w rejonie prowadzonej eksploatacji. Wiedza ta może być wystarczająca do wprowadzenia profilaktyki ochronnej stateczności wyrobisk górniczych. Podejmowane działania zależą od zaistniałego problemu i polegają na:

– zmianie kierunku drążenia wyrobisk kopalnianych i przyjęciu optymalnego kierunku postępu frontu w polu,
– odpowiednim doborze obudowy górniczej (np. kotwienie różnopoziomowe, zagęszczanie siatki kotwienia przy narożach wyrobisk),
– wywołaniu zjawiska „cienia naprężeniowego".

### 4.3. Drążenie wyrobisk w strefie tzw. „cienia naprężeniowego"

Nierzadko w światowym górnictwie podziemnym, podczas wybierania złoża, skutecznym sposobem poprawy stateczności wyrobisk jest ich drążenie w strefie tzw. „cienia naprężeniowego" [8,25]. Koncepcję tę stosuje się z powodzeniem w górnictwie amerykańskim. W rozwiązaniu tym kierunek wybierania złoża powinien być tak zorientowany, aby front eksploatacyjny znajdował się w „cieniu naprężeniowym".

Zasadę drążenia wyrobiska korytarzowego w strefie tzw. „cienia naprężeniowego" przedstawiono na rys. 12. Zgodnie z nią wyrobiska górnicze dzieli się na wyrobiska „tracone" i wyrobiska „chronione". Wyrobisko „tracone" pełni rolę „zasłony naprężeniowej" w stosunku do działających poziomych naprężeń i ma stwarzać korzystne warunki geomechaniczne dla wyrobisk „chronionych" [26].




Rys. 12. Wykonanie statecznego wyrobiska w „cieniu naprężeniowym" kosztem wyrobiska „traconego" [25]

Wyrobisko zlokalizowane w strefie „cienia naprężeniowego" może zachować swoją stateczność i będzie chronione przed negatywnymi wpływami naprężeń poziomych, przy uwzględnieniu racjonalnych zasad ich zabezpieczenia [25], odpowiedniej odległości między nimi. Jako pierwsze powinno być drążone wyrobisko najmniej ważne, tzw. wyrobisko „tracone". Postęp tego wyrobiska musi być bardziej zaawansowany w stosunku do pozostałych wyrobisk, a pogorszenie jego stateczności powinno spowodować powstanie strefy „cienia naprężeniowego". Uzyskanie większej strefy odprężonej nad i pod wyrobiskiem „traconym" powoduje większy zasięg strefy „cienia naprężeniowego" w górotworze. Zadaniem obudowy tego wyrobiska jest opóźnianie możliwego zawału do czasu, gdy wyrobisko nie będzie już wykorzystywane przez załogę i maszyny górnicze [28].

Efekt „zasłony naprężeniowej" zmniejsza się wraz z odległością od wyrobiska „traconego". Dlatego istotne znaczenie ma odległość pomiędzy wyrobiskiem „chronionym" i „traconym", czyli rozmiar filara pozostawionego pomiędzy wyrobiskami. Drążenie wyrobisk górniczych w strefie cienia naprężeniowego jest bardzo dobrym rozwiązaniem dla ochrony grupy wyrobisk, prowadzonych w kierunku prostopadłym do kierunku działania największej składowej naprężeń poziomych w górotworze.

## 4.4. Ocena stanu potencjalnego zagrożenia wskaźnikiem PNP

Przykładowym elementem profilaktyki zagrożenia zawałowego w wyrobiskach podziemnych może być ocena potencjalnego stanu takiego zagrożenia prowadzona na podstawie oszacowanej wartości Potencjału Naprężeń Poziomych (PNP), zaproponowanego przez C. Marka [25]. Metoda ta powstała na podstawie wieloletnich obserwacji dołowych w amerykańskich kopalniach podziemnych i zasadniczo wypracowana została dla istniejących w tych rejonach warunków geologiczno-górniczych. Określenie wielkości PNP dla projektowanej eksploatacji w danym rejonie kopalni pozwala z wyprzedzeniem oszacować możliwe problemy z utrzymaniem stateczności wyrobisk i podjąć działania profilaktyczne. Jest to prosty system punktacji obrazujący zagrożenie stateczności stropu wyrobiska, które znajduje się w strefie działania poziomych naprężeń.

Przy szacowaniu wartości PNP (tabela 2) określa się punktowo stopnie oczekiwanego zagrożenia. Punktacja obejmuje takie grupy zagadnieniowe, jak:

- głębokość eksploatacji,
- budowa geologiczna skał stropowych,
- orientacja kierunku postępu frontu względem kierunku działania największej składowej naprężeń poziomych,
- technologia eksploatacji.

Na podstawie oszacowanej wartości PNP określa się możliwość wystąpienia utraty stateczności wyrobisk górniczych sugerując się opracowanymi przedziałami liczbowymi:

– z dużym prawdopodobieństwem można spodziewać się poważnych problemów z utrzymaniem stropów i najprawdopodobniej będzie konieczne wprowadzenie dodatkowych rozwiązań technicznych: PNP > 20,
– uszkodzenia stropów wyrobisk na skutek działania wzmożonych naprężeń poziomych są mało prawdopodobne, należy jednak być przygotowanym do wprowadzenia pewnych elementów profilaktyki: 15 < PNP ≤ 20,
– problemy z utrzymaniem stropów wyrobisk na skutek działania poziomych naprężeń są bardzo mało prawdopodobne: PNP ≤ 15.

Tabela 2

Sposób określenia Potencjału Naprężeń Poziomych [25]

| **Grupa zagadnieniowa** | **Kryteria szczegółowe** | **Punktacja kryterialna** |
|---|---|---|
| Głębokość eksploatacji | < 100 m | 0 |
| | 100–200 m | 3 |
| | 200–330 m | 6 |
| | >330 m | 8 |
| Budowa geologiczna stropu bezpośredniego | masywny piaskowiec lub wapień | 0 |
| | pyłowiec, grubość ławic > 0,2 m | 4 |
| | węgiel lub słaby łupek | 8 |
| | cienko uławicony piaskowiec | 8 |
| | cienko uwarstwiony łupek | 12 |
| Orientacja kierunku postępu frontu (drążenie wyrobiska) względem kierunku działania największej składowej naprężeń poziomych | równoległa | 2 |
| | 45º | 4 |
| | prostopadła | 6 |
| Charakterystyka prowadzonej eksploatacji od granic | brak eksploatacji od granic | 0 |
| | technologia ścianowa ze strefą roboczą w „cieniu naprężeniowym” | 3 |
| | z likwidacją filarów | 3 |
| | technologia ścianowa z frontem w strefie koncentracji naprężeń | 10 |
| Razem PNP | | 2–36 |

## 5. Podsumowanie

Zastosowanie metod pomiarowych do wyznaczania wartości i kierunków naprężeń w podziemnych zakładach górniczych pozwala rozpoznać pierwotne pole naprężeń w określonej partii górotworu.

Znajomość kierunków i wartości pierwotnych naprężeń głównych w górotworze, a także maksymalnej i minimalnej składowej naprężenia poziomego może mieć istotne znaczenie dla bezpiecznego i efektywnego sposobu prowadzenia robót górniczych. Pozwala ona w warunkach zagrożenia sejsmicznego i zawałowego na:

- weryfikowanie kierunków drążenia wyrobisk udostępniająco-przygotowawczych,
- wyznaczenie optymalnych kierunków postępu frontów eksploatacyjnych,
- doskonalenie doboru parametrów systemów eksploatacji w trudnych warunkach geologiczno-górniczych,
- dobór obudowy kotwowej adekwatny do zróżnicowanych warunków budowy skał stropowych.

### Literatura

[1] Agapito J., Gilbride L., 2002, Horizontal stresses as indicators of roof stability. SME Annual Meeting, February, Phoenix, Arizona.

[2] Amadei B., Stephansson O., 2009, Rock stress and its measurement. Chapman & Hall, London.

[3] Butra J., Pytel W., 1998, Room and pillar mine workings subjected to high level horizontal stress. 7th International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection, Calgary.

[4] Butra J., Kicki J., 2003, Ewolucja technologii eksploatacji złóż rud miedzi w polskich kopalniach. Biblioteka Szkoły Eksploatacji Podziemnej, Kraków.

[5] Butra J. i inni, 2010, Określenie wpływu kierunków i wielkości naprężeń pierwotnych na optymalną geometrię rozcinki udostępniającej i prowadzenia frontów eksploatacyjnych. Praca niepublikowana KGHM Cuprum CBR, Wrocław.

[6] Cała M., Tajduś A., 2001, Mechanizm współpracy kotwi z górotworem o zróżnicowanej budowie. Biblioteka Szkoły Eksploatacji Podziemnej, Kraków.

[7] Daws G., Hons B., 1992, Kotwienie stropu w górnictwie węglowym – projektowanie i realizacja. Wiadomości Górnicze Nr 1, s. 27–32.

[8] Fabich S., Pytel W. i inni, 2003, Określenie naprężeń w górotworze w różnych warunkach geologiczno-górniczych na podstawie badań in-situ, Etap I. Praca niepublikowana KGHM Cuprum CBR, Wrocław.

[9] Fabjanczyk M. i inni, 1997, Pomiar przedeksploatacyjnego pola naprężeń w KGHM Polska Miedź S.A. O/ZG Rudna. Materiały Szkoły Eksploatacji Podziemnej, Szczyrk.

[10] Fabjanczyk M., 2001, Zastosowanie monitoringu w projektowaniu i zarządzaniu systemami kotwienia. Materiały konferencyjne Nowoczesne Technologie Górnicze.

[11] Fabjanczyk M. i inni, 2006, Methods of Interpreting Ground Stress Based on Underground Stress Measurements and Numerical Modelling. Coal Operators Conference, University of Wollongong, Australia.

[12] Gergowicz Z., 1974, Geotechnika górnicza. Wydawnictwo PWr, Wrocław.
[13] Goszcz A., 1999, Elementy mechaniki skał oraz tąpania w polskich kopalniach węgla i miedzi. Biblioteka Szkoły Eksploatacji Podziemnej, Kraków.
[14] Han J., Zhang P. T., 2010, The in situ stress state of Kailuan mining area. 5th International Symposium ISRM "In situ rock stress", Beijing.
[15] Hoek E., Brown E. T., 1978, Trends in Relationships between Measured In-Situ Stresses and Depth. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 15.
[16] Hoek E., 2007, Practical Rock Engineering. Wydawnictwo Balkema.
[17] Iannacchione A., 1997, Roof and Rib Hazard Assessment for Underground Stone Mines.
[18] Jarosiński M., 2006, Źródła współczesnych naprężeń tektonicznych w Europie Środkowej w świetle modelowań elementami skończonymi. Przegląd Górniczy nr 8.
[19] Kidybiński A., 1982, Podstawy mechaniki kopalnianej. Wydawnictwo Śląsk, Katowice.
[20] Kłeczek Z.,1994, Geomechanika górnicza. Śląskie Wydawnictwo, Katowice.
[21] Lubryka M., Śliwiński J., 2004, Analiza stateczności wyrobisk z uwzględnieniem pierwotnego stanu naprężeń w aspekcie projektowanej rozcinki na poziomie -800 w KWK „Jas-Mos". Materiały Zimowej Szkoły Mechaniki Górotworu, Zakopane.
[22] Mark C., 1991, Horizontal stress and its effects on longwall ground control. Mining Engineering 11.
[23] Mark C., Mucho T., P., 1994, Longwall mine design for control of horizontal stress. U.S. Bureau of Mines Technology Transfer Seminar, Special Publication.
[24] Mark C., Mucho T., P., 1998, Horizontal stress and longwall headgate ground control. Mining Engineering, January.
[25] Mark C., 2001, Focus on Ground Control: Horizontal Stress. Coal Age, March 1.
[26] Pawelus D., 2007, Określenie pola naprężeń górotworu w Zakładzie Górniczym „Rudna" na podstawie badań in-situ. Materiały VII Konferencji Naukowej Doktorantów „Interdyscyplinarne zagadnienia w górnictwie i geologii", Szklarska Poręba.
[27] Pawelus D., 2008, Ocena wpływu naprężeń poziomych na stateczność wyrobisk ścianowych w kopalniach węgla kamiennego. Materiały Szkoły Eksploatacji Podziemnej, Szczyrk.
[28] Pawelus D., 2010, Wpływ naprężeń poziomych na stateczność podziemnych wyrobisk górniczych w kopalniach rud miedzi. Praca doktorska, Wrocław.
[29] Polska Norma: Szyby Górnicze – obudowa – obciążenie, PN-G-05016, maj 1997.
[30] Praca zbiorowa, 1996, Opracowanie metody wyznaczania głównych kierunków naprężeń poziomych w polach eksploatacyjnych – sprawozdanie dla KGHM Polska Miedź S.A., ZG Rudna. Praca niepublikowana Arnall Poland sp. z o.o., Kłobuck.
[31] Reynolds Ch., 1994, The experiences and new directions of roofbolting in Australian coal mines. Materiały Szkoły Eksploatacji Podziemnej.
[32] Strona internetowa: http://dc-app3-14.gfz-potsdam.de

[33] Tajduś A., Flisiak M., Cała M., 2004, Wpływ pierwotnego stanu naprężenia w górotworze na zagrożenie tąpaniami. Materiały XI Międzynarodowej Konferencji Naukowo-Technicznej, Ustroń.
[34] Terzaghi K., Richart F., 1952, Stresses in rock about cavities. Geotechnique, vol. 3, June.
[35] Zoback M. L., 1992, First and second-order patterns of stress in the lithosphere: The World Stress Map Project. Journal Geophys. Res., 97.

## The effect of primary stress on underground excavations stability

*Key words: primary stress field, underground excavations stability, improvement of excavations stability*

*This paper presents the effect of intensive horizontal stress on underground excavations stability. It describes the protection methods of excavations stability improvement. These methods are using for the mining in the world.*